

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.09.029

一种离散连续混成的时空事件驱动的 CPS 体系架构

赵红专^{1,2}, 孙棣华^{1,2}, 程森林^{1,2}, 赵 敏^{1,2}

(1. 信息物理社会可信服务计算教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400044; 2. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

摘 要: 为描述信息物理融合系统(cyber-physical system, CPS)中离散信息系统和连续物理系统交互融合的混成特性, 基于混成自动机理论, 结合多智能体系统(multi-agent system, MAS)和时空事件驱动方法, 提出一种 CPS 体系架构. 该架构用改进的混成自动机理论刻画了离散空间和连续状态混成的 CPS 体系架构的主体, 同时定义了基于时空事件的 CPS 事件, 设计了基于 MAS 的 CPS 端, 并运用定义不同功能的 CPS 端和 CPS 事件驱动机制解析了 CPS 体系架构内部信息物理交互反馈过程. 最后以车速调控系统为例, 采用提出的 CPS 体系架构分析了协同驾驶过程中单一车辆内部速度调控的信息物理融合过程, 并对其进行了形式化描述, 实例的形式化过程表明提出的体系架构的有效性. 构建的 CPS 体系架构为刻画 CPS 的本质特征提供了新的方法.

关键词: 信息物理融合系统; 体系架构; 混成自动机理论; 多智能体系统; 时空事件

中图分类号: TP30 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)09-0170-06

A hybrid discrete and continuous CPS architecture driven by spatial-temporal event

ZHAO Hongzhuan^{1,2}, SUN Dihua^{1,2}, CHEN Senlin^{1,2}, ZHAO Min^{1,2}

(1.Key Laboratory of Cyber Physical Social Dependable Service Computation (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400044, China; 2.School of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to describe the hybrid characteristics of the discrete cyber system and the continuous physical system, a novel CPS architecture is proposed based on hybrid automata model, Multi-Agent System (MAS) and spatial-temporal event driven mechanism. The main body of our CPS architecture is constructed based on improved hybrid automata theory. Meanwhile, by defining spatial-temporal event-based CPS event, designing the MAS-based CPS client architecture, and using the defined CPS clients with different functions and CPS event driven mechanism, the inherent cyber physical interaction and feedback process of the CPS architecture is analyzed. Finally, taking the vehicular velocity regulation and control system for instance, the inherent cyber-physical fusion process of vehicular velocity regulation and control in cooperative driving system is analyzed and formalized with our proposed CPS architecture, and the formalization process demonstrates the effectiveness of our proposed CPS architecture. The proposed CPS architecture provides novel thoughts and methods for describing the inherent characteristics of CPS.

Keywords: cyber-physical system (CPS); system architecture; hybrid automata theory; multi-agent system (MAS); spatial-temporal event

CPS 具有对信息世界和物理世界全新的理解方式和对系统设计的全新思想, 一经提出就受到各国以及学术界的高度重视^[1-3]. CPS 是在时空事件驱

动机制下并通过离散信息作用的连续物理演化过程, 因此, CPS 的本质特征在于其离散的信息系统和连续的物理系统交互融合, 具有典型的时空混成特性^[4-6]. CPS 的时空混成特性具体体现在计算实体和物理实体在空间及时间上的相关性, 通过时间和空间位置来确定事件执行顺序、确保系统状态和行为的正确性. 因此, CPS 的系统体系架构及其内部融合机理是影响 CPS 实用性与效率的关键因素之一, 对此展开探索有助于深入理解 CPS 思想和利用

收稿日期: 2015-06-14
基金项目: 国家自然科学基金(61573075); 重庆市“151”科技重大专项(cstc2013jcsf-zdxxqX0003); 中央高校基本科研业务费专项基金(106112014CDJZR178801); 重庆市自然科学基金(cstc2016jcyjA0565)
作者简介: 赵红专(1985—), 男, 博士研究生;
孙棣华(1962—), 男, 教授, 博士生导师
通信作者: 孙棣华, d3sun@163.com

CPS 解决实际应用中具有 CPS 典型特征的问题^[7-9].

现有 CPS 体系架构的研究主要集中在对已有嵌入式系统和计算机网络架构进行改进和拓展, 通过分层并刻画各层的特征和结构来具体描述 CPS 体系架构. 如文献[10]基于网络和嵌入式系统技术分层设计了 CPS 体系架构, 每层进行了详细描述, 但对架构的整体特性刻画不够; 文献[11]从嵌入式系统网络化的角度提出了一种 CPS 体系结构原型, 该体系结构原型满足 CPS 的几个本质特征要求, 如: 及时性、分布性、可靠性、容错性、安全性、可扩展性和自治性, 但未用具体的案例分析体现原型系统的特征; 文献[12]通过分析智能交通系统(intelligent transportation system, ITS)与 CPS 的现状, 并结合交通系统的特点, 构建了交通信息物理融合系统(transportation cyber-physical system, T-CPS)基本架构, 诠释了 T-CPS 各层次的功能及特点, 讨论了 T-CPS 的若干关键技术, 但机理分析欠深入. 文献[13]中提出了信息物理网(cyber-physical internet, CPI)的概念, 并在原来计算机网络 5 层体系结构的基础上增加了 CPS 层. 此外, 也有从管理和服务的角度对 CPS 体系架构的研究, 如文献[14]从交通事故管理的角度提出了一种 CPS 感知控制结构, 但未涉及 CPS 混成特性; 文献[15]提出了一种基于服务 CPS 体系架构, 融合了计算和物理进程, 但未涉及其时空特性. 随着对 CPS 混成特性的不断重视, 现有涉及 CPS 混成特性的研究多集中在具体应用系统混成特性的形式化描述, 未对 CPS 体系架构进行系统归纳和抽象^[16]. 通过对研究现状的分析发现, 国内外对 CPS 体系架构的研究还处于探索阶段, 尚未形成统一的 CPS 体系架构, 特别是难以体现 CPS 典型的时空混成特性. 为此, 本文以 CPS 中离散信息系统和连续物理系统的混成特性为切入点, 通过解析 CPS 混成特性和时空特性, 形成新的基于混成自动机的离散空间和连续状态混成的时空事件驱动的 CPS 体系架构.

CPS 体系架构的设计

1.1 CPS 本质特征

CPS 是信息世界和物理世界高度融合的系统. 美国自然科学基金^[1]、Sztipanovits J^[4]、Edward Lee^[17]、温景容^[8]、周兴社^[18]以及朱敏^[19]等描述了 CPS 系统并总结了 CPS 系统的本质特征. 通过归纳, CPS 本质特征主要表现在: 1) 信息处理进程与物理控制进程紧密结合, 地位平等; 2) CPS 体现为多尺度, 高可靠性; 3) CPS 是一种分析系统内部运

行机理来解决问题的新思想; 4) CPS 是典型的时空系统; 5) CPS 是基于时空事件触发的分布式系统; 6) CPS 具备动态重组、重配置和自治特性; 7) CPS 是高安全和低时延系统; 8) CPS 能够统一、标准化系统内部异质元素, 是分析典型信息物理系统的内部机制的有效方法.

1.2 CPS 体系架构

现有极具代表性的研究, 如 Edward Lee 等^[17]基于嵌入式系统理论定义了 CPS, 利用嵌入式计算机和网络对物理过程进行监测和控制, 并通过反馈实现计算和物理过程的相互影响; Liu Sha 等^[20]基于实时同步系统和复杂控制系统, 阐述了 CPS 在设计和实现过程中面临的一些挑战以及引言中阐述的基于计算机网络层次结构、管理和服务等角度研究 CPS 体系架构.

然而, CPS 是通过离散信息空间的信息因素来影响物理空间的连续过程, 在有效处理信息的基础上, 经过交互反馈实现深度融合, 进而可有效控制物理对象, 最终提供高效服务. 因此, 文章针对 CPS 的本质特征, 从 CPS 时空混成特性以及时空动态演化的角度, 借鉴混成自动机模型来描述 CPS 的离散与连续的混成特性, 采用时空事件描述方法刻画 CPS 时空事件, 同时, 参考 MAS 的智能自治性和协调交互性来设计 CPS 端结构. 将三者有机结合, 进而可以形成一种新的面向离散和连续混成的 CPS 体系架构.

1.2.1 CPS 体系架构的混成特性描述

混成自动机模型(hybrid automation model, HAM)是一种针对离散状态和连续变化混合系统的形式化描述. 混成自动机是在时间自动机的基础上, 增加随时间连续变化的变量, 并通过微分方程描述这些变量的连续动态行为. 混成自动机模型作为混合系统形式化描述和算法分析框架, 对强时空特性的混合系统建模和体系架构设计具有参考价值^[21-22].

因此, 可以将 CPS 离散性和连续性统一在混成自动机抽象模型中, 借鉴混成自动机模型将描述连续动态行为的微分方程嵌入到传统的离散状态机模型中, 从而使自动机模型具有了描述连续行为能力.

为构建 CPS 体系架构的主体, 首先定义一个七元组 $(L, C, X, W, E, A_{inv}, A_{act})$, 表达式为

$$A = (L, C, X, W, E, A_{inv}, A_{act}).$$

其中: L 为混成自动机离散状态集, 构成 CPS 离散状态空间; C 为用于标记状态转换的边; X 为混成自动机连续状态集, 构成 CPS 连续状态空间; W 为系统初始状态的集合, $W \subseteq L \times X$; E 为各个离散状

态 $l \in L$ 下的连续动态方程的集合, $L \times X \rightarrow X$; A_{inv} 为赋给每个离散状态 $l \in L$ 一个不变集, 表示位置集 L 到 X 之间的映射, 对 $l \in L$, 存在 $A_{inv}(l) \subset X$, 同时存在连续状态 $x \in A_{inv}(l)$, 当 CPS 在离散空间内从离散状态 l 中的连续动作脱离不变集时, CPS 离散空间发生离散迁移; A_{act} 为在 $l \in L$ 下的映射, 表示在位置 $l \in L$ 处, CPS 的连续状态变量 x 、其微分 $\dot{x}$ 以及连续外部变量 w 之间的交互关系, 表达式为 $f(x, \dot{x}, w) = 0$, 该方程的解集构成 CPS 在 $l \in L$ 处的活动, 该方程称为 CPS 状态转换条件。

基于混成自动机模型构建的 CPS 体系架构中, 用混成自动机的离散状态体现 CPS 的离散特征, CPS 每一个离散状态有一个使其保持在这个离散状态的关联不变式, 通过有向边结构表示离散状态之间的迁移关系. 利用防卫条件和重置条件标记每条边的连续状态, 防卫条件也称为迁移条件, 重置条件是在迁移发生后, 触发条件重置, 为下一次状态转换提供限制条件. 当满足防卫条件和重置条件时, 实现离散的状态迁移. 基于混成自动机模型的 CPS 状态为一个二元偶, 即

$$S = F(q, x).$$

其中: q 为离散状态, x 为连续变量, $q \in Q$, q 满足 $A_{inv}(q)$.

设基于混成自动机的 CPS 的两个转换状态为 $S_i = F(q_i, x_i)$, $S_j = F(q_j, x_j)$, 如果存在状态迁移 $e \in E: q_i \rightarrow q_j$, 并且 x_i, x_j 的取值满足 e 上的防卫条件和重置条件, 这个迁移 (S_i, S_j) 称为一个跳转, S_j 为 S_i 的跳转后继. 这个过程可以描述 CPS 信息空间与物理空间的交互过程.

1.2.2 基于 MAS 的 CPS 端结构设计

MAS 由不同的单个 Agent 为完成某一特定任务组成的集合. 单个 Agent 要对周围环境状况作出实时、准确的响应, 同时能处理与其他 Agent 的冲突, 或者与其他 Agent 协调处理冲突、规划行为并最终作出决策. Agent 通过传感器感知环境, 通过执行动作实现其目标来影响环境^[23]. MAS 的自组织能力和智能协调能力为 CPS 端的设计提供了设计思路

将 CPS 信息基元和物理基元智能融合后得出决策的执行机构以及外部信息的感知和执行结果反馈的端口, 称为 CPS 端. CPS 端按功能需求, 或完成信息转换, 或完成能量转换. 因此, CPS 端是 CPS 不可或缺的部分. 基于 MAS 和 CPS 端的功能特性, 设计的 CPS 端 D_{client} 可以描述为

$$D_{client} = (C_{ID}, F, S, T, O, P, A, I, E, R_{FB}).$$

其中: C_{ID} 为区分不同的功能的 CPS 端的 ID; F 为描述单一 CPS 端自身功能的函数; S 为单一 CPS 端在

完成任务和实时交互过程中的实时状态集; T 为单一 CPS 端的自身任务集; O 为单一 CPS 端需要实现的目标集; P 为单一 CPS 端为完成任务应采取的策略集; A 为完成任务所执行的动作集; I 为单一 CPS 端完成任务所需要的各种信息的集; E 为从外部环境获取的信息集; R_{FB} 为任务执行结果的反馈信息集.

CPS 端通过感知外部环境信息, 采集物理对象状态信息并结合信息物理融合获得的决策对外部请求或控制对象作出迅速的响应, 同时能与其他 CPS 端协调并处理冲突, 规划行为并共同完成任务以准确控制物理对象. CPS 端结构如图 1 所示.

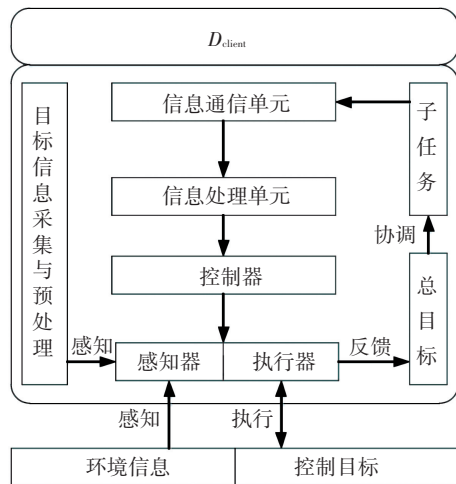


图 1 CPS 端结构

Fig.1 The architecture of CPS client

CPS 端根据不同的功能而分为感知 CPS 端、控制 CPS 端、执行 CPS 端以及协调 CPS 端, 其中感知 CPS 端、执行 CPS 端以及控制 CPS 端之间通过互通信息和状态反馈进行信息或能量的转换, 或控制物理对象执行任务, 或感知物理对象状态和环境信息; 协调 CPS 端根据各 CPS 端状态, 动态分配任务, 协调各 CPS 端共同完成目标. CPS 端因完成不同任务存在差异性, 这种差异性表现为体量、位置以及功能的差异.

在上述 CPS 体系架构主体的基础上, 利用 MAS 的特征设计的 CPS 端则在 CPS 主体的层面上完善了 CPS, 同时引入驱动 CPS 运转的 CPS 时空事件, 最终构建了准确描述 CPS 特征的基于混成自动机的多智能体时空事件驱动的 CPS 体系架构, 构建的 CPS 体系架构如图 2 所示.

在上述 CPS 体系架构中, 信息和能量的转换是一个不断循环的过程. 感知 CPS 端获取环境和物理对象状态信息的过程, 可以理解为物理系统的能量转化为信息系统的信息过程; 信息空间的决策信息送入控制 CPS 端, 协调 CPS 端与控制 CPS 端通过互

联互通互操作形成决策指令,并传入执行 CPS 端准确控制物理对象,这个过程可以理解为信息系统的信息转化为物理系统能量转化的过程. 因此,整个信息和能量的转换往复循环都是通过协调 CPS 端与其他 CPS 端的通信、分配、调节以及协同任务共同完成的.

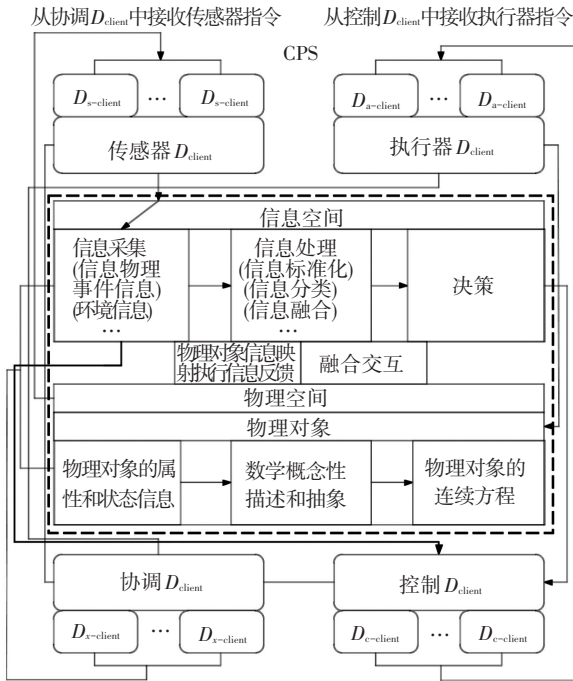


图 2 CPS 体系架构

Fig.2 The architecture of cyber-physical systems

2 CPS 融合循环过程

CPS 融合循环过程是基于 CPS 时空事件驱动的能量与信息转换过程,从控制系统角度可以将这个过程看成是一个前馈补偿和反馈控制相结合的综合过程.

2.1 基于时空特性的 CPS 事件模型

在 CPS 中,事件的时间和空间特性是体现 CPS 交互融合的本质特征之一,其物理事件的发生在时间和空间上一般是分离的,而事件的时空信息在采集、传输及处理过程中却具有同步特性. 信息系统中,时间是离散的点,精确度受到诸多限制;物理系统中,物理对象状态是连续的动态演变,演变过程受时间约束和标识. 因此,时空事件根据事件属性、时间和地点描述信息世界或者物理世界的一个或者多个目标的状态,一般可以定义为

$$E\{t_i, l_i, V_i\}.$$

式中: E 为事件类型识别符, i 为事件序列号, t_i 为事件发生的时间, l_i 为事件发生地点, V_i 为事件发生属性的集合. 在此基础上,结合 CPS 事件的本质属性,得到 CPS 时空事件的模型^[24], 表示为

$$E_{CP}(S_i, E_{CP}^i) \{t_{CP}^k, l_{CP}^k, t_{CP}^{eo}, l_{CP}^{eo}, V_{CP}, \rho_{CP}\}.$$

其中: S_i 为传感器节点,基于信息物理事件标识符 E_{CP}^i 产生事件; $t_{CP}^k(S_i, E_{CP}^i)$ 和 $l_{CP}^k(S_i, E_{CP}^i)$ 分别为传感器节点产生事件的时间和位置; $t_{CP}^{eo}(S_i, E_{CP}^i)$ 、 $l_{CP}^{eo}(S_i, E_{CP}^i)$ 和 $V_{CP}(S_i, E_{CP}^i)$ 分别为 CPS 事件估算发生的时间、位置和属性; $\rho_{CP}(S_i, E_{CP}^i)$ 为传感器节点的置信水平.

2.2 基于 CPS 时空事件驱动的前馈补偿和反馈控制过程

CPS 时空事件的发生会影响目标物理对象的控制决策和状态改变. 因此,感知 CPS 端实时感知目标物理对象初始状态,在 CPS 时空事件发生之前,将 CPS 时空事件发生的动作信息同时传给受控对象,参与目标物理对象的控制决策. 这种动作信息称为前馈信息. CPS 前馈信息连同目标本身状态信息经过采集、传输、处理后,得到实现目标物理对象状态改变的决策信息. 将此决策信息传到控制 CPS 端,形成决策指令,此时协调 CPS 端与控制 CPS 端互联互通互操作,执行 CPS 端接收决策指令改变目标物理对象状态,控制完成后的目标对象状态反馈到目标物理对象的信息空间,根据目标误差调整控制命令,如此循环,最终准确控制物理对象达到误差范围内的目标状态,完成反馈控制. 前馈补偿和反馈控制同时进行,在目标规定误差范围内有限循环,形成 CPS 能量和信息转换的内部运转循环过程,其流程如图 3 所示.

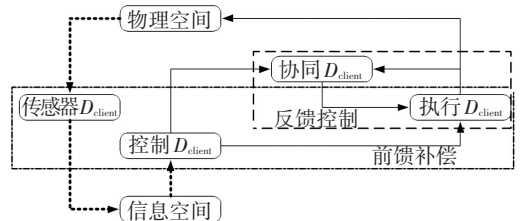


图 3 CPS 运转循环过程

Fig.3 The process of CPS forecast running and circulation

3 实例描述与分析

在有效通信的范围内,道路中的多辆通信车辆可以看成是一个具有自主协调能力的有机组合体,通过车车交互协调,形成车间距和车速稳定的车流,能有效提高道路中车辆的主动安全性、车流行驶速度和道路通行能力^[25-26]. 车辆信息系统和物理系统交互融合,在逻辑或物理上相邻的通信车辆构成的协同驾驶系统就是一个典型的 CPS. 单一车辆作为受控目标和信息载体,在交通信息以及其他车辆信息的影响下,通过各种 CPS 端结构的交互融合,从而与逻辑或物理上相邻的通信车辆构成协同驾驶系

统. 因此, 单一车辆内部的信息物理融合过程如图 4 所示.

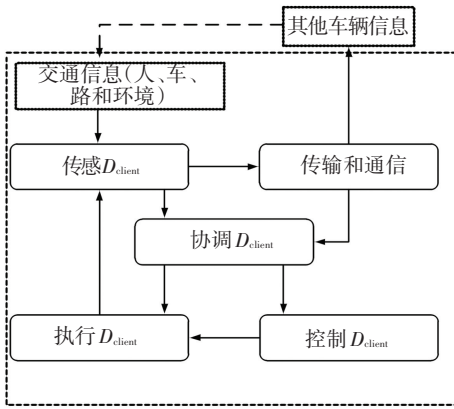


图 4 单一车辆的 CPS 单元

Fig.4 CPS unit of a single vehicle single

车辆状态的改变是通过其速度的改变来实现的. 因此, 通过形式化描述车辆速度控制过程来刻画车辆内部信息物理融合过程. 驾驶者通过油门踏板传送一个油门指令给发动机, 发动机将一个转速送到传动装置, 此时油门传感器将油门的状态信息送到传动装置, 传动装置将转速转化成输出力矩送到车轮, 车速传感器将当前车速信息发送给传动控制装置, 传动控制装置根据驾驶者油门指令信息、当前速度信息以及控制规则库向传动装置发出控制命令, 以实时控制车速的大小. 单一车辆速度控制系统如图 5 所示.

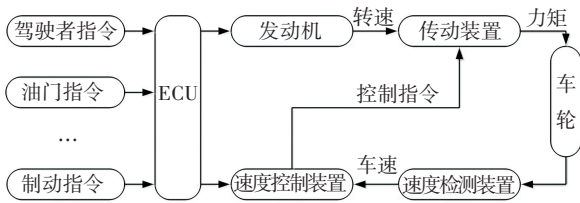


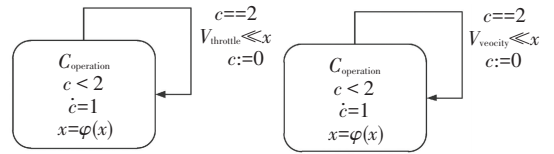
图 5 车辆速度控制系统

Fig.5 The vehicle velocity control system

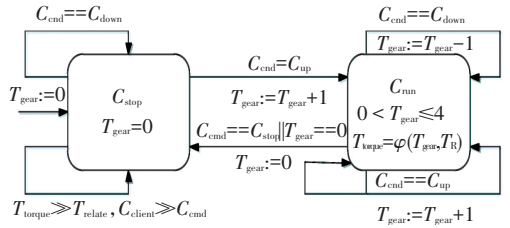
通过对车辆内部感知、传动以及控制 3 个步骤的形式化建模, 来分析协同系统中单一车辆信息物理融合过程^[27].

控制 CPS 端的建模为 $C_{client} = (C_{cmd}, c \rightarrow \{C_{up}, C_{down}, C_{stop}\})$, 传动 CPS 端的建模为 $T_{client} = (T_{trans}, \{T_{gear}, C_{cmd}, T_{torque}, T_R\}, \{T_{relate}, C_{client}\}, \{T_{out}, T_{dom}, T_{HA}, T_{system}, D_{TCS}\})$, 感知 CPS 端的建模为 $P_{client} = (\{P_{throttle}, x \rightarrow [0, 1]\}, \{P_{system}, P_{HA}\}, D_{SSA})$. 其中, C_{cmd} 为控制指令集; $C_{operation}$ 为控制操作集; T_{trans} 为传动指令集; T_{gear} 为加速档类别; T_{torque} 为传动输出矩; T_R 为传动转速; T_{system} 为传动系统函数; HA 为组件动态行为的混成自动机; dom 为组件属性到数据类型的映射关系; $T_{dom}(T_{gear}) = \{1, 2, 3, 4\}$;

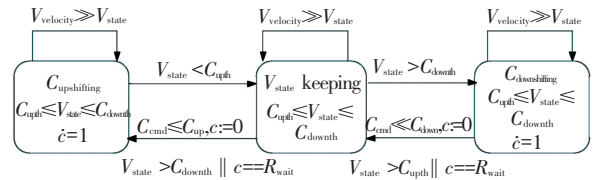
D_{TCS} 为传动控制系统函数; $P_{throttle}$ 为油门控制指令集; $\varphi(x)$ 为油门开度函数; D_{SSA} 为车速感知服务函数; 数据信息的两种操作读和写分别用“ $\gg$ ”和“ $\ll$ ”表示, $V_{velocity} \gg V_{state}$ 表示从端口读入数据变量 $V_{velocity}$ 到车辆模式 V_{state} 中, $V_{velocity} \ll V_{state}$ 表示将车辆模式 V_{state} 从端口输出变量 $V_{velocity}$; “||”为逻辑或, “:=”为初始化赋值; C_{upth} 与 C_{downth} 表示车辆模式的阈值. 单一车辆的 CPS 运行控制系统如图 6 所示.



(a) 感知过程



(b) 传动过程



(c) 控制过程

图 6 单一车辆信息物理融合过程模型示意图

Fig.6 The process of cyber physical fusion model of a single vehicle in cooperative driving system

基于建立的 CPS 体系架构来形式化描述协同驾驶中单一车辆的信息物理融合过程, 能够客观地刻画典型 CPS 应用系统的信息物理融合过程, 体现其交互反馈的本质特征.

4 结 论

1) 针对 CPS 的本质特征和内部运转规律, 构建了一种离散连续混成的时空事件驱动的 CPS 体系架构. 提出的体系架构描述了 CPS 中离散连续的时空混成特性, 同时运用信息与能量的循环转换来解析 CPS 信息物理融合的过程.

2) 提出的体系架构突破了传统 CPS 体系架构仅仅是对计算机网络分层体系的改进与升级, 是对 CPS 体系架构理论的一种新探索和尝试.

3) 提出的体系架构是一种表征 CPS 框架和刻画信息物理融合过程的新方法, 在理论上为未来 CPS 的发展和体系架构的设计提供参考, 同时, 在实践中为解决各种典型信息物理融合问题, 特别是刻

画交通应用系统本质特征和揭示交通领域强时空混成系统的内部运转规律提供了新的思路.

参考文献

[1] Domestic Policy Council Office of Science and Technology Policy. American competitiveness initiative [R]. Washington DC: Domestic Policy Council Office of Science and Technology Policy, 2006.

[2] PCAST. Leadership under challenge: information technology R&D in a competitive world[R]. Washington DC:PCAST,2010.

[3] 中国国家自然科学基金委员会 2010 项目指南:重点项目[EB/OL]. (2010-02-01)[2012-01-25]. <http://www.nsf.gov.cn/nsfc/cen/xmzn/2010xmzn/02/06.html>.
The National Natural Science Foundation of China. 2010 project guide: the key project [EB/OL]. (2010-02-01)[2012-01-25]. <http://www.nsf.gov.cn/nsfc/cen/xmzn/2010xmzn/02/06.html>.

[4] SZTIPANOVITS J, KOUTSOUKOS X, KARSAI G, et al. Toward a science of cyber-physical system integration [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1): 29-44.

[5] BAHETI R, GILL H. Cyber-physical systems[J]. The Impact of Control Technology, 2011, 12: 161-166.

[6] HU F. Cyber-physical systems: integrated computing and engineering design [M]. New York: CRC Press, 2013:1-365.

[7] LI H, LAI L, POOR H V. Multicast routing for decentralized control of cyber physical systems with an application in smart grid[J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 2012, 30(6): 1097-1107.

[8] 温景容, 武穆清, 宿景芳. 信息物理融合系统[J]. 自动化学报, 2012, 38(4): 507-517.
WEN Jingrong, WU Muqing, SU Jingfang. Cyber-physical system [J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(4): 507-517.

[9] WANG Z, SONG H, WATKINS D W, et al. Cyber-physical systems for water sustainability: challenges and opportunities [J]. Communications Magazine, IEEE, 2015, 53(5): 216-222.

[10] 陈丽娜, 王小乐, 邓苏. CPS 体系结构设计[J]. 计算机科学, 2011, 38(5): 295-300.
CHEN Lina, WANG Xiaole, DENG Su. Cyber-physical system architecture design[J]. Computer Science, 2011, 38(5): 295-300.

[11] 王中杰, 谢璐璐. 信息物理融合系统研究综述[J]. 自动化学报, 2011, 37(10): 1157-1166.
WANG Zhongjie, XIE Lulu. Cyber-physical systems: a survey [J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(10): 1157-1166.

[12] 孙棣华, 李永福, 刘卫宁, 等. 交通信息物理系统及其关键技术研究综述[J]. 中国公路学报, 2013, 26(1): 144-155.
SUN Dihua, Li Yongfu, LIU Weining, et al. Research summary on transportation cyber physical systems and the challenging technologies [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(1): 144-155.

[13] ABAD F A T, CACCAMO M, ROBBINS B. A fault resilient architecture for distributed cyber-physical systems[C]//2012 IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications. Seoul: IEEE, 2012: 222-231.

[14] WANG Y, TAN G, WANG Y, et al. Perceptual control architecture for cyber-physical systems in traffic incident management[J]. Journal of Systems Architecture, 2012, 58(10): 398-411.

[15] YU C, JING S, LI X. Anarchitecture of cyber physical system based on service [C]//Computer Science & Service System (CSSS), 2012 International Conference on. Nanjing: IEEE, 2012: 1409-1412.

[16] HU L, XIE N, KUANG Z, et al. Review of cyber-physical system architecture [C]//Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing Workshops (ISORCW), 2012 15th IEEE International Symposium on. Shenzhen: IEEE, 2012: 25-30.

[17] EIDSON J C, LEE E A, MATICS, et al. Distributed real-time software for cyber-physical systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1): 45-59.

[18] 周兴社, 杨亚磊, 杨刚. 信息-物理融合系统动态行为模型构建方法[J]. 计算机学报, 2014, 37(6): 1411-1423.
ZHOU Xingshe, YANG Yalei, YANG Gang. Modeling methods for dynamic behaviors of cyber-physical system [J]. Chinese Journal of Computers, 2014, 37(6): 1411-1423.

[19] 朱敏, 李必信, 陈乔乔, 等. 基于微分动态逻辑的 CPS 建模与属性验证[J]. 电子学报, 2012, 40(6): 1126-1132.
ZHU Min, LI Bixin, CHEN Qiaoqiao, et al. Transforming hybridUML to hybrid program for CPS property verification [J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(6): 1126-1132.

[20] SHA L, GOPALAKRISHNAN S, LIU X, et al. Cyber-physical systems: a new frontier [M]//Machine Learning in Cyber Trust. Berlin: Springer, 2009: 3-13.

[21] LYGEROS J, JOHANSSON K H, SIMIC S N, et al. Dynamical properties of hybrid automata [J]. Automatic Control, IEEE Transactions on, 2003, 48(1): 2-17.

[22] HENZINGER T A. The theory of hybrid automata[M]//Verification of Digital and Hybrid Systems. Berlin: Springer, 2000: 265-292.

[23] YUCELEN T, HADDAD W M. Consensus protocols for networked multi-agent systems with a uniformly continuous quasi-resetting architecture [J]. International Journal of Control, 2014, 87(8): 1716-1727.

[24] VEDULA S, BAKER S, KANADE T. Image-basedspatio-temporal modeling and view interpolation of dynamic events[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2005, 24(2): 240-261.

[25] KIM S W, QIN B, CHONG Z J, et al. Multivehicle cooperative driving using cooperative perception: design and experimental validation [J]. Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on, 2015, 16(2): 663-680.

[26] YANG A, NAEEM W, FEI M. Decentralised formation control and stability analysis for multi-vehicle cooperative manoeuvre [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2014, 1(1): 92-100.

[27] JAMSHIDI S, BEHM J E, EVEILLARD D, et al. Using hybrid automata modeling to study phenotypic plasticity and allocation strategies in the plant mycorrhizal mutualism [J]. Ecological Modelling, 2015, 311(10): 11-19.

(编辑 魏希柱)